

Minderung der Lüftungsgeräusche angetriebener Schienenfahrzeuge

Hauptbericht

Autor: Gerhard Reiss, Siemens AG, Transportation Systems, Trains

Auszug aus Schlussbericht gemäß NKBF 98

Der vollständige Schlussbericht mit ausführlicher Dokumentierung der Ergebnisse wird bei der Technischen Informationsbibliothek der Universitätsbibliothek Hannover (TIB) verfügbar sein.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Beteiligte Partner

Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH in Krefeld

(jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Trains),

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Antriebstechnik in Berlin

Behr Industry GmbH & Co in Stuttgart

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandte Forschung e. V.,

bzw. Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart ("IBP")

Siemens Verkehrstechnik in Erlangen

(jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Trains),

Siemens Krauss-Maffei in München

(jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Locomotives),

Deutsche Bahn AG, Forschungs- und Technologiezentrum in München

Siemens AG, A&D, Ventilatoren in Bremen

Inhaltsverzeichnis:

1	Übersicht.....	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen	1
1.2.1	Politisches Umfeld	1
1.2.2	Technische Bedeutung.....	1
1.3	Forschungspartner.....	2
1.4	Planung und Ablauf.....	2
1.4.1	Grundlegende Ideen	2
1.4.2	Planung	3
1.4.3	Ablauf	3
1.5	Stand der Wissenschaft und Technik	3
1.5.1	Wissenschaftliche Grundlagen	3
1.5.2	Technische Maßnahmen am angetriebenen Schienenfahrzeug	4
1.5.3	Technische Maßnahmen an den Schienenverkehrswegen.....	4
1.6	Bisherige Arbeiten der Partner:.....	4
1.7	Angaben zur Fachliteratur sowie der Informationsdienste.....	5
1.8	Zusammenarbeit mit anderen Partnern	5
1.9	Veröffentlichungen	5
2	Ergebnisse.....	5
2.1	Bestandsaufnahme und Analyse	5
2.1.1	Analyse des gültigen Regelwerks.....	5
2.1.2	Geräuschanteile und Lastenheft.....	6
2.1.3	Komponentenanordnung	7
2.1.4	Wärmetechnische Bilanzierung von Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage	7
2.1.5	Schalltechnische Bilanzierung von Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage	8
2.1.6	Stand der Schallschutztechnik	8
2.2	Modellbildung.....	9
2.2.1	Modellstufe 1: Modellbildung Kühler.....	9
2.2.2	Modellstufe 1: Modellbildung Ventilator.....	10
2.2.3	Modellstufe 1: Gesamtmodell der Kühl- bzw. Lüftungsanlage.....	10
2.2.4	Modellstufe 2: Akustische Modellierung des Lüftungsgeräuschs am Beispiel einer E-Lok, Recherche	11
2.2.5	Modellstufe 2: Vorbereitung der Modellbildung und Erfassung der akustisch relevanten Daten (E-Lok)	12
2.2.6	Vergleich von Messung und Simulation	12
2.3	Untersuchung verschiedener Lösungskonzepte für Triebzug und E-Lok	13
2.3.1	Anwendung des Modells, Parameterstudie	13
2.3.2	Entwicklung von Leitlinien	14
2.3.3	Auswahl je einer Lösungsvariante für Triebzug und E-Lok	15
2.4	Auslegung und Konstruktion der Funktionsmuster für E-Lok und Triebzug.....	16
2.4.1	Auslegung der geräuschoptimierten Kühlanlage (je eine für Triebzug und E-Lok)	16
2.4.2	Experimentelle schall- und strömungstechnische Untersuchungen an Komponenten und Baugruppen.....	17
2.4.3	Konstruktion des Funktionsmusters: Kühlanlage Triebzug.....	17
2.4.4	Konstruktion des Funktionsmusters: Kühlanlage E-Lokomotive.....	18
2.4.5	Schalltechnische Hinweise für die Auslegung von Kühl- bzw. Lüftungsanlagen	18
2.5	Bau der Funktionsmuster.....	19
2.5.1	Bau des Triebzug-Funktionsmusters	19

2.5.2 Bau des E-Lokomotiven-Funktionsmusters	19
2.5.3 Einarbeitung und Umsetzung von Modifikationen	20
2.6 Vermessung der Funktionsmuster für Triebzug und E-Lok	21
2.6.1 Vermessung des Triebzug-Funktionsmusters	22
2.6.2 Vermessung des E-Lok-Funktionsmusters	22
3 Zusammenfassung und Ausblick	24
4 Literatur	26

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Am Vorhaben beteiligte Unternehmen und Forschungseinrichtungen	2
Tabelle 2: Arbeitsschritte	3

Abbildungsverzeichnis:

Bild 1: Querschnitte der Kulissenabsorber (hier Mittelkulisse) auf der Einlassseite des Triebzug-Funktionsmodells (Varianten a) und b) wurden nicht untersucht)	21
Bild 2: Verbesserung der Einströmsituation im Ansaugbereich des E-Lok-Funktionsmusters, (links Ansaug auf drei Seiten, rechts Ansaug auf vier Seiten)	21

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AS	Arbeitsschritt
DB	Deutsche Bahn AG
FSA	Fliehkraft-Sedimentationsabscheider
ICE-T	Elektrischer Triebzug der Baureihe 411, 1. Bauserie
ICT2	Elektrischer Triebzug der Baureihe 411, 2. Bauserie
SAD	Siemens AG, A&D
SDS	Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH (jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Trains)
SKM	Siemens Krauss-Maffei GmbH (jetzt Siemens AG, Transportation Systems, Locomotives)
STS	Siemens AG, Transportation Systems
TSI CR	Technical Specification for Interoperability of the trans-European conventional rail system (Technische Spezifikation für die Interoperabilität des konventionellen transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems)
TSI HS	Technical Specification for Interoperability of the trans-European high-speed rail system (Technische Spezifikation für die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems)

Verzeichnis der Anlagen im Schlussbericht:

- Anlage 1: Bericht zum Arbeitsschritt 1.1:
Analyse des gültigen Regelwerks
- Anlage 2: Bericht zum Arbeitsschritt 1.2:
Geräuschanteile und Lastenheft
- Anlage 3: Bericht zum Arbeitsschritt 1.3:
Komponentenanordnung
- Anlage 4: Bericht zum Arbeitsschritt 1.4:
Wärmetechnische Bilanzierung von Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage
- Anlage 5: Bericht zum Arbeitsschritt 1.5:
Schalltechnische Bilanzierung von Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage
- Anlage 6: Bericht zum Arbeitsschritt 1.6:
Stand der Schallschutztechnik
- Anlage 7: Bericht zum Arbeitsschritt 2.1:
Modellstufe 1: Modellbildung Kühler
- Anlage 8: Bericht zum Arbeitsschritt 2.2:
Modellstufe 1: Modellbildung Ventilator
- Anlage 9: Bericht zum Arbeitsschritt 2.3:
Modellstufe 1: Gesamtmodell der Kühl- bzw. Lüftungsanlage
- Anlage 10: Bericht zum Arbeitsschritt 2.4:
Modellstufe 2: Akustische Modellierung des Lüftungsgeräuschs am Beispiel einer E-Lok, Recherche
- Anlage 11: Bericht zum Arbeitsschritt 2.5:
Modellstufe 2: Vorbereitung der Modellbildung und Erfassung der akustisch relevanten Daten (E-Lok)
- Anlage 12: Bericht zum Arbeitsschritt 2.6:
Vergleich von Messung und Simulation
- Anlage 13: Bericht zum Arbeitsschritt 3.1:
Anwendung des Modells, Parameterstudie
- Anlage 14: Bericht zum Arbeitsschritt 3.2:
Entwicklung von Leitlinien
- Anlage 15: Bericht zum Arbeitsschritt 3.3:
Auswahl je einer Lösungsvariante für Triebzug und E-Lok
- Anlage 16: Bericht zum Arbeitsschritt 4.1:
Auslegung der geräuschoptimierten Kühlanlage
(je eine für Triebzug und E-Lok)
- Anlage 17: Bericht zum Arbeitsschritt 4.2:
Experimentelle schall- und strömungstechnische Untersuchungen an Komponenten und Baugruppen
- Anlage 18: Bericht zum Arbeitsschritt 4.3:
Konstruktion des Funktionsmusters: Kühlanlage Triebzug
- Anlage 19: Bericht zum Arbeitsschritt 4.4:
Konstruktion des Funktionsmusters: Kühlanlage E-Lokomotive
- Anlage 20: Bericht zum Arbeitsschritt 4.5:
Schalltechnische Hinweise für die Auslegung von Kühl- bzw. Lüftungsanlagen
- Anlage 21: Bericht zum Arbeitsschritt 5.1:
Bau des Triebzug-Funktionsmusters

- Anlage 22: Bericht zum Arbeitsschritt 5.2:
Bau des E-Lokomotiven-Funktionsmusters
- Anlage 23: Bericht zum Arbeitsschritt 6.1:
Vermessung des Triebzug-Funktionsmusters
- Anlage 24: Bericht zum Arbeitsschritt 6.2:
Vermessung des E-Lok-Funktionsmusters

1 Übersicht

1.1 Aufgabenstellung

Die bei der Kühlung (Entwärmung) von Antriebskomponenten entstehenden Lüftungsgeräusche können im Stand oder bei langsamer Fahrt zu störender Schallemission eines Schienenfahrzeugs führen. Ziel dieses Vorhabens ist die Verringerung der A-bewerteten Lüftungsgeräusche um 8 dB.

Das Ziel sollte zum Einen über die Entwicklung eines Berechnungs- und Prognosetools erreicht werden, das die Optimierung der für Schienenfahrzeuge üblichen Lüftungsanlagen unterstützt. Zum Anderen war die technische Machbarkeit an vorhandenen Schienenfahrzeugen nachzuweisen.

1.2 Voraussetzungen

Im Verbundprojekt „Leise Züge und Trassen“ werden Forschungsvorhaben zusammengeführt, in denen alle Facetten des Schienenverkehrslärms untersucht und Maßnahmen zur Geräuschreduktion erarbeitet werden.

Das hier beschriebene Forschungsvorhaben AP 4220 „Minderung der Lüftungsgeräusche angetriebener Schienenfahrzeuge“ gehört zum Verbundprojekts 4000 „Leise Züge und Trassen“ und ist dort dem Teilprojekt 4200 „Antriebsgeräusche“ zugeordnet.

1.2.1 Politisches Umfeld

Die zunehmende Sensibilisierung der Bevölkerung gegenüber Lärm und die bereits begonnene gesetzliche Limitierung der Schallemission von Schienenfahrzeugen haben den Handlungsdruck auf die Schienenfahrzeugindustrie und die Bahnbetreiber zur Senkung der Lüftungsgeräusche deutlich erhöht.

Bis zum Dezember 2002 wurde die Stärke der Stillstandsgeräusche, die sich im Wesentlichen aus der Überlagerung verschiedener Ventilatorgeräusche ergibt, ausschließlich zwischen zwei Vertragspartnern vereinbart. Jetzt muss sie für neue Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge bereits nach europäischem Gesetz (TSI HS) begrenzt werden. Vielleicht noch in 2004, spätestens aber in 2005 wird auch die Schallemission der konventionellen Züge auf europäischer Ebene durch die TSI CR gesetzlich geregelt.

1.2.2 Technische Bedeutung

Es gibt eine nicht unerhebliche Nachfrage nach Triebfahrzeugen mit leistungsstarken Antrieben, die zwangsweise einen hohen Kühlluftbedarf aufweisen. Wegen des knappen Bau- raums für die Lüftungsanlage wird der Luftdurchsatz oft durch eine Anhebung der Ventilator- drehzahl erreicht. Da die Schalleistung eines Ventilators etwa mit der fünften Potenz der Drehzahl steigt, erklärt sich das zum Teil hohe Lüftergeräusch.

Die Senkung hoher Lüftungsgeräusche ist eine systemtechnische Aufgabe, die unter voller Beachtung der übrigen an die Antriebskomponenten gestellten Anforderungen gelöst werden muss. Diese Problematik tritt bei allen schienenengebundenen Fahrzeugen auf. Deshalb werden in diesem Arbeitspaket sowohl Triebzüge als auch Lokomotiven behandelt. Im Vorhaben arbeiteten Betreiber, Bahnindustrie (Systemhaus sowie Komponentenhersteller) und Forschungseinrichtungen zusammen, so dass eine breite fachliche Basis gewährleistet war.

1.3 Forschungspartner

An dem Forschungsvorhaben waren die in **Tabelle 1** aufgeführten Unternehmen und Forschungseinrichtungen beteiligt.

Zwischen Antragsphase und Bewilligung änderten sich einige Firmennamen und Rechtsformen. In diesem Bericht werden die alten Bezeichnung weiter verwendet, um den direkten Bezug zum Forschungsantrag und seiner Bewilligung zu erhalten.

Tabelle 1: Am Vorhaben beteiligte Unternehmen und Forschungseinrichtungen

Unternehmen / Forschungseinrichtung	Status	
	Behr Industry GmbH & Co. in Stuttgart	Partner
	Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik, in München	Partner
	Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik in Berlin	Partner
	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart	Partner
	Siemens A&D, Ventilatoren in Bremen	Partner
	Siemens Krauss-Maffei in München jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Locomotives (TS LM EN)	Partner
	Siemens Verkehrstechnik in Erlangen jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Trains (TS TR EN 04)	Partner
	Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH in Krefeld jetzt: Siemens AG, Transportation Systems, Trains (TS TR EN 02)	Partner, Federführer
MÜLLER-BBM	Müller-BBM GmbH in Planegg bei München	Unterauftragnehmer
	TU-Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge in Berlin	Unterauftragnehmer

1.4 Planung und Ablauf

1.4.1 Grundlegende Ideen

Das Forschungsvorhaben gliederte sich im Wesentlichen in zwei große Phasen.

In der ersten, vorwiegend theoretischen Phase sollte für die Planung ein Berechnungstool zur Strömungstechnik, Thermodynamik und Akustik der im Schienenfahrzeugbau üblichen

Kühl- bzw. Lüftungsanlagen erstellt werden. Mit dem Tool waren die Grundlagen für eine in die Breite gehende Reduzierung der Lüftungsgeräusche von angetriebenen Schienenfahrzeugen zu schaffen, indem sich das Tool auf sehr viele im Schienenfahrzeugbau auftretenden Lüftungsanlagen anwenden lässt.

In der zweiten, praktischen Phase stand der Nachweis für die technische Machbarkeit der Dämpfungsmaßnahmen an. Je ein schallreduziertes Funktionsmuster einer Kühlanlage für einen Triebwagen und für eine E-Lok wurde unter Einbeziehung des Tools konzipiert, konstruiert, gefertigt, akustisch vermessen und mit den Vorgängeranlagen verglichen.

1.4.2 Planung

Der terminliche Ablauf und die Aufteilung der einzelnen Leistungsanteile wurde im Vorfeld unter den Partnern abgestimmt und im Einzelnen im Schlussbericht zur Vorhabensbeschreibung des AP 4220 festgeschrieben.

Das Projekt wurde in 7 Einzelarbeitsschritte mit unterschiedlicher Verantwortlichkeit gegliedert (siehe **Tabelle 2**).

Tabelle 2: Arbeitsschritte

AS	Tätigkeit	Verantwortlich
1	Bestandsaufnahme und Analyse	DB
2	Modellbildung	Siemens-Duewag, Siemens Krauss-Maffei
3	Untersuchung verschiedener Lösungskonzepte	DLR, Berlin
4	Auslegung und Konstruktion der Funktionsmuster	Siemens A&D
5	Bau der Funktionsmuster	Behr Industrietechnik
6	Vermessung der Funktionsmuster	DB
7	Berichterstattung und Koordination des Arbeitspaketes	Siemens-Duewag

Mit Ausnahme des Arbeitsschrittes 6, des messtechnischen Nachweises, waren alle Partner an der Bearbeitung der Arbeitsschritte beteiligt.

1.4.3 Ablauf

Das Vorhaben wurde rückwirkend mit einer Laufzeit vom 01.07.2001 – 30.09.2003 bewilligt. Bedingt durch die Ausweitung der theoretischen und messtechnischen Untersuchungen zu den Eigenschaften der Komponenten und deren Nachbildung im Tool entstand ein frühzeitiger Zeitverzug gegenüber den ersten Planungen, so dass im April 2003 eine dreimonatige, kostenneutrale Verlängerung beantragt und genehmigt wurde.

1.5 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik wird in den Teilberichten zu den Arbeitsschritten wiedergegeben. Hier sollen nur einige generelle Anmerkungen herausgestellt werden.

1.5.1 Wissenschaftliche Grundlagen

Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden wissenschaftliche Grundlagen aus Strömungstechnik, Akustik, Aeroakustik und Thermodynamik benötigt. Für die meisten der in

Lüftungsanlagen verwendeten Komponenten und Bauteile sind diesbezügliche Grundlagen vorhanden, auf die das Vorhaben aufsetzen konnte. Besonders zu den Ventilatoren gibt es eine Vielzahl von Literaturstellen. Die anderen Komponenten wie z. B. Kanalstücke, Absorber und Gitter sind in der Literatur weniger stark vertreten, aber auch hier lassen sich Quellen finden.

Das prinzipielle Problem der allgemeinen Modellbeschreibung liegt darin, dass die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten oft für eine Optimierung des Lüftungssystems nicht ausreichen, weil dann die speziellen Druckverluste und die Strömungsgeräusche der konkreten Bauteile in die Berechnungen eingehen müssen.

1.5.2 Technische Maßnahmen am angetriebenen Schienenfahrzeug

Die Hersteller von Schienenfahrzeugen sind bestrebt, angetriebene Schienenfahrzeuge mit möglichst lärmarmen Kühl- und Lüftungsanlagen auszustatten. Meist beschränkt sich die Verbesserungsmaßnahme darauf, eine laute Komponente (z. B. den Ventilator) durch eine leisere zu ersetzen. Die lärmindernden Potentiale einer durch Systembetrachtung und den Einsatz von absorbierenden Bauteilen ertüchtigten Anlage werden auf diese Weise nicht ausgeschöpft.

Bislang wird in kritischen Fällen, wie zum Beispiel am Bahnsteig, kurzzeitig eine Drehzahlreduzierung vorgenommen, die mit einer Reduzierung der Kühlleistung einhergeht. Diese Maßnahme ist wegen der Aufrechterhaltung der erforderlichen Mindestkühlleistung nicht beliebig auszuweiten.

1.5.3 Technische Maßnahmen an den Schienenverkehrswegen

Die Senkung des Lärmpegels in der Umgebung der Schienenverkehrswege kann auch durch das Aufstellen von Lärmschutzwänden erreicht werden. Wegen der hohen Kosten bleiben diese Maßnahmen auf Wohngebiete beschränkt. Im europäischen Forschungsprojekt STAIRRS [35] wurde das große Investitionsvolumen und das schlechte Kosten/Nutzen-Verhältnis der Lärmschutzwände bestätigt.

1.6 Bisherige Arbeiten der Partner:

Die Industriepartner dieses Vorhabens haben bereits Maßnahmen zur Geräuschminderung an Kühl- bzw. Lüftungsanlagen untersucht und teilweise als Einzelmaßnahmen umgesetzt. Die Arbeiten der wissenschaftlichen und wissenschaftsnahen Partner und Unterauftragnehmer garantierten somit den schnellen Zugang zum heutigen Stand der Akustik-Forschung und deren Nutzung. Unterstützend wirkte dabei eine Vielzahl von Vorarbeiten und Veröffentlichungen aus den Reihen der Partner dieses Vorhabens, z. B.:

- Vorschriften und Normen sind u. a. Erfahrungsschwerpunkte von DB AG und Müller-BBM,
- Standgeräuschmessungen und ihre Auswertungen sind sehr häufig durchgeführte Tätigkeiten von DB AG, Siemens VT8, Siemens Duewag und Siemens Krauss-Maffei
- Drehzahlregelungen der Lüfter sind bei DB AG, Siemens A&D und DLR erprobt [5],
- Schalldämmmaßnahmen an Kühlanlagen wurden bereits von Behr vorgenommen,
- Strömungstechnik und Strömungssimulation sind Teil der Systemauslegung bei Siemens Duewag,
- Modifikation der Lüftungsgitter wurden mit Erfolg von Siemens VT8 durchgeführt,
- Ventilatorlärm und seine Reduzierung sind Fachthemen von Siemens A&D und DLR [7], [11], [15], [27]
- Schallgedämpfte Lüfter wurden von Siemens A&D erprobt.

- Schalldämpfer und ihre Auslegung gehören zum Know-how von IBP und Müller-BBM [28], [33].

1.7 Angaben zur Fachliteratur sowie der Informationsdienste

Die verwendete Literatur und die Informationsdienste sind im Kapitel „Literaturverzeichnis“ zusammengefasst.

Während der Durchführung des Vorhabens sind den Forschungspartnern keine Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

1.8 Zusammenarbeit mit anderen Partnern

Die Partner des Vorhabens sowie die bereits am Anfang feststehenden Unterauftragnehmer (Müller-BBM, TU-Berlin) haben erwartungsgemäß das gesamte Spektrum der für den Erfolg des Vorhabens notwendigen Kompetenz abdecken können. Die Einbindung Dritter erfolgte daher nur im Einzelfall, so z. B. Lieferanten von Lüftungsgittern für Testzwecke.

1.9 Veröffentlichungen

Der erste Vorstellung des Forschungsvorhabens fand auf der Konferenz „EURONOISE 2003“ (Neapel, Italien vom 19. bis 21. Mai 2003) durch Herrn Prof. Hecht statt. Zum diesem Zeitpunkt lagen noch keine Ergebnisse von den Funktionsmustern vor.

Das Vorhaben und seine Ergebnisse wurde durch den Projektleiter auf dem Statusseminar „Leiser Verkehr, Lärmforschung im Forschungsprogramm Mobilität und Verkehr“ am 17. und 18. Juni 2003 in Bonn dem europäischen Fachpublikum präsentiert [34].

Die vom Fraunhofer IBP durchgeführten Messungen und Untersuchungen am Funktionsmuster der E-Lok wurden auf der Gemeinschaftstagung CFA/DAGA '04 in Straßburg, Frankreich (22.-25.03.2004) vorgestellt [36].

Der vorliegende Schlussbericht wird bei der Technischen Informationsbibliothek der Universitätsbibliothek Hannover (TIB) verfügbar sein.

2 Ergebnisse

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte in den sieben in Tabelle 2 genannten Arbeitsschritten.

2.1 Bestandsaufnahme und Analyse

Im ersten Arbeitsschritt des Vorhabens wurden die gültigen Regelwerke (Normen, Richtlinien und Gesetze) analysiert und die akustischen Anforderungen an Schienenfahrzeuge und Komponenten, das aktuelle Niveau der Standgeräusche von Schienenfahrzeugen, die Messverfahren und grundlegende theoretische Ansätze für die geplanten Berechnungen zusammengetragen.

2.1.1 Analyse des gültigen Regelwerks

Ablauf und Tätigkeiten

Zur Analyse des gültigen Regelwerks wurden folgenden Tätigkeiten ausgeführt.

Deutsche Bahn
zusammen mit

Zusammenstellung, Analyse und Bewertung der vorhandenen
Regelwerke und der Messvorschrift prEN ISO 3095.

Müller BBM

Siemens VT	Erfassung, Auswertung und kritische Beurteilung vorhandener Regelwerke unter Ausnutzung der bei VT vorhandenen elektronischen Normendatenbank.
Siemens Duewag	Zusammenstellung, Analyse und Bewertung der akustischen Regeln und Normen, die bei Neukonstruktionen zur Anwendung kommen.
Siemens Krauss-Maffei	Mitwirkung bei der kategorischen Erfassung der Vorschriften und Regeln.

Fachliche Ergebnisse

Zur Messung der Lüftergeräusche von fertigen Schienenfahrzeugen soll der europäische Normenentwurf prEN ISO 3095:2001 zur Anwendung kommen. Wegen der oft geringen Abstände zwischen Ausblasöffnung und Fahrweg, Bahnsteig oder Oberleitung müssen gelegentlich besondere, von der Norm abweichende Mikrofonpositionen hingenommen werden.

Zur Auswahl lärmarmen Konstruktionen ist die Durchführung akustischer Messungen an Komponenten bereits in der Planungs- und Konstruktionsphase der Schienenfahrzeuge zweckmäßig. In diesem Fall sind Messungen unter Freifeld-Bedingungen zu bevorzugen.

Die Schallemission von Ventilatoren und Kühlanlagen kann durch einschlägige DIN- oder ISO-Normen bestimmt werden.

2.1.2 Geräuschanteile und Lastenheft

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Analyse der vorhandenen Lastenhefte im Hinblick auf Geräuschanteile der Wärmetauscher.
Deutsche Bahn zusammen mit Müller BBM	Vergleich der vorhandenen Lastenhefte mit Messdaten hinsichtlich Einhaltung, auch externer Anforderungen des Immissions-schutzes.
Siemens A&D	Zusammenstellung des Stands der Lüfterausführungen und Einbausituation bei neueren Triebfahrzeugen in Hinblick auf Lüftungsgeräuschentwicklung. Nennung der Hauptmerkmale der jeweiligen Konstruktion.
Siemens VT	Zusammenstellung des Stands der Technik der Lüftungsanlagen von Triebzügen unter Berücksichtigung verschiedener Einbausituationen.
Siemens Duewag	Zusammenstellung des Stands der Technik, der bei den neueren Triebfahrzeugen bezüglich des Lüftungsgeräuschs erreicht wird. Auflistung der Hauptmerkmale der jeweiligen Konstruktion.
Siemens Krauss-Maffei	Mitwirkung bei der Erstellung eines Lastenhefts für das Gesamtgeräusch im Stand und bei Fahrt der Lok (E- und D-Lok).

Fachliche Ergebnisse

Das Niveau der zur Zeit an deutschen Schienenfahrzeugen anzutreffenden Standgeräusche wird aufgelistet. Einige hohe Geräuschniveaus unterstreichen die Bedeutung des vorliegenden Forschungsvorhabens. Es zeigen sich große Differenzen im Standgeräusch zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen, aber auch innerhalb einer Fahrzeugklasse sind die Ge-

räuschniveaus nicht einheitlich. Ein Grund liegt darin, dass das Geräuschniveau der Lüftungsanlagen nicht unbedingt an die abzuführende Leistung gekoppelt ist.

An einer Skizze zur Unterflurbelegung eines Hochgeschwindigkeitszuges wird die Vielzahl der dort angeordneten Kühlanlagen deutlich.

Es wurden Beispiele für die

- Volumenströme und Geräusche von einzelnen Kühlaggregate
- Geräuschniveaus von in Schienenfahrzeugen eingesetzten Ventilatoren,
- Geräusche von Kühlern

gesammelt.

2.1.3 Komponentenordnung

Ablauf und Tätigkeiten

Siemens VT	Zusammenstellung, Systematisierung und Dokumentation der spezifischen Komponentenordnung in Triebzügen.
Siemens Krauss-Maffei	Betrachtung der Anordnung der Aggregate in der E- und D-Lok: Ausarbeitung der Unterschiede zwischen Lok und Triebzug und Ausnutzung von Synergieeffekten zusammen mit Partner.

Fachliche Ergebnisse

Die wesentlichen Komponenten von Lüftungsanlagen für E-Lok, Diesellok und Triebwagen und einige ihrer charakteristischen Eigenschaften wurden aufgelistet, ihre Abfolge im Lüftungsstrang skizziert und typische Anordnungen des Lüfterstrangs in den Fahrzeugen aufgezeigt.

2.1.4 Wärmetechnische Bilanzierung von Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage

Ablauf und Tätigkeiten

Siemens VT	Wärmetechnische Bilanzierung der bestehenden Anlagen und Systeme in Triebzügen.
Siemens Krauss-Maffei	Mitwirkung bei der wärmetechnischen Bilanzierung des Belüftungssystems der Anwendungsfahrzeuge anhand des erforderlichen Wärmehaushalts und der Lastkollektive der Verbraucher (Betrachtung von E- und D-Lok).

Fachliche Ergebnisse

Bereits in Bericht zum Arbeitsschritt 1.3 des Vorhabens wurden typische Kühlluft-Volumenströme eines Triebzugs genannt. Bei den Triebzügen hat meist jede zu kühlende Komponente ihre eigene Kühlanlage. Der erforderliche Volumenstrom lässt sich nach Kenntnis der Randbedingungen relativ leicht berechnen.

Gleiches gilt auch für Lokomotiven; jedoch kommt hier die Zwangsbelüftung des Maschinenraums hinzu. Es wurden typische Volumenströme recherchiert und eine Wärmebilanz für den Maschinenraum vorgenommen.

2.1.5 Schalltechnische Bilanzierung von Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage

Ablauf und Tätigkeiten

Deutsche Bahn	Analyse vorhandener Messergebnisse hinsichtlich Geräuschminderungsmöglichkeiten unter Beteiligung der Bauart-Betreuungsstellen der DB AG.
Fraunhofer IBP	Analyse der schalltechnisch relevanten Einzelkomponenten und ihrer akustischen Verknüpfung (Netzwerkbetrachtungen).
Siemens VT zusammen mit Müller BBM	Betrachtung der einzelnen Komponenten der Kühl- bzw. Lüftungsanlage unter schalltechnischen Gesichtspunkten sowie die Bilanzierung ihrer akustisch relevanten Eigenschaften.
Siemens Duewag	Darstellung der strömungstechnischen Vorgänge in einer Kühlanlage und Zuordnung der Druckverlustanteile in den einzelnen Baugruppen.
Siemens Krauss-Maffei	Mitwirkung bei der schalltechnischen Analyse, u. a. durch Ausarbeitung von Ansätzen zur Geräuschminderung.

Fachliche Ergebnisse

Es wurden verschiedene Ansätze zur schalltechnische Bilanzierung einer Kühl- bzw. Lüftungsanlage zusammengestellt und beschrieben. Die einzelnen Anlagenkomponenten werden aufgelistet und hinsichtlich ihrer Schalleistungspegel und Strömungsverluste sowie anderer konstruktiver Eigenschaften (z. B. Gewicht, Brandschutz und Kosten) bewertet.

An Hand einer ersten schalltechnischen Grobanalyse am Beispiel eines Triebzugwagens werden die Schallemissionen berechnet und die Vorteile von Schalldämpfern zum Erreichen eines niedrigen Schallniveaus aufgezeigt. Es wird auf die Potentiale zur Schallminderung der Komponenten eingegangen.

Die Möglichkeiten der Netzwerkbetrachtung und die zugehörige Modellierung von Komponenten werden beschrieben.

Zur Analyse der Strömungstechnik wird ein eindimensionaler Ansatz und die Verwendung numerischer Verfahren (CFD) vorgestellt und bewertet.

2.1.6 Stand der Schallschutztechnik

Ablauf und Tätigkeiten

DLR Berlin	In einer Bestandsaufnahme wird die Schallemission der in Schienenfahrzeugen eingesetzten Ventilatoren mit denen in stationären Lüftungsanlagen verglichen und bewertet.
Siemens A&D zusammen mit	Zusammenstellung möglicher Schallschutzmaßnahmen an Lüftern und stationären Anlagen.

Müller BBM

Fachliche Ergebnisse

Der Vergleich der Schallemission von in Schienenfahrzeugen eingesetzten Ventilatoren mit denen in stationären Lüftungsanlagen wurde über den sogenannten spezifischen Schalleistungspegel geführt. Die dazu notwendige Theorie zum strömungsmechanischen Verhalten der Ventilatoren sowie die mathematische Beschreibung des Ventilatorgeräusches, die Modellvorstellungen nach Madison und Regenscheit und die in Normen und Richtlinien dargestellten Schalleistungen werden aufgeführt. Die verschiedenen Ventilator-Bauformen werden hinsichtlich ihrer spezifischen Schalleistung bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass sich die spezifischen Schalleistungen der in Schienenfahrzeugen eingesetzten Ventilatoren nicht von denen in stationären Anlagen verwendeten unterscheiden.

2.2 Modellbildung

Eine Kühlanlage besteht mindestens aus einem Ventilator und einem Kühler. Sie werden je nach Anlage durch gerade Kanalstücke, 90°-Umlenkungen mit/ohne Bedämpfung, Abscheidgitter, Kühler, Filter und Schalldämpfer (Kulissenschalldämpfer) ergänzt. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten zur Strömungstechnik, Thermodynamik und Akustik dieser Komponenten und der Modellvorstellungen „Hohlraumabsorption“ und „Ausblasen ins Freie“ wurden für mehrere Bauformen in einem Berechnungstool erfasst und zu einem System verknüpft.

Weiter wurde für die E-Lokomotive als Beispielfahrzeug auch das im AP 4210 „Akustisches Qualitätsmanagement“ entwickelte Prognose-Tool zur Vorhersage der zu erwartenden Schallemissionen des Gesamtfahrzeugs angewendet. Dadurch entstand eine starke Verknüpfung der beiden Arbeitspakete. Die Ergebnisse aus den akustischen Messungen und dem Vergleich mit der Simulation in AP 4220 dienten direkt der Optimierung und Validierung des Prognose-Tools in AP 4210.

2.2.1 Modellstufe 1: Modellbildung Kühler

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik Systemanalyse, Methoden der Modellbildung, Modellbildung.
zusammen mit
Müller BBM

Fachliche Ergebnisse

Die Prognose der Schallemission einer Kühl- oder Lüftungsanlage muss auch die thermodynamischen, akustischen und strömungstechnischen Eigenschaften des Kühlers einbeziehen. Es wurde ein einfaches Rechenmodell für die so genannte Luftseite des Kühlers aufgestellt. Die Vereinfachung bezieht sich darauf, dass die Kühlleistung im Rahmen der Schallprognose als unveränderliche Eingangsgröße angesehen wird.

Die schall- und strömungstechnischen Kenngrößen (Druckverlust, Strömungsgeräusche und Luftschalldämmung) wurden für typische Kühlerbauformen der Fa. Behr in eigens durchgeführten Messungen ermittelt. Damit konnten die in Arbeitsschritt 1.2 zusammengestellten Beschreibungen bestätigt, im Falle des Strömungsgeräusches und der Schalldämmung verbessert werden.

2.2.2 Modellstufe 1: Modellbildung Ventilator

Ablauf und Tätigkeiten

DLR Berlin	Modellbildung Ventilatorgeräusche; gemeinsam mit den Partnern werden für die betrachteten Ventilator Typen empirische Modelle für die emittierte Schalleistung in Abhängigkeit von den Hauptabmessungen, den Betriebsparametern und der Luftleistung aufgestellt.
Siemens A&D	Aerodynamisches und akustisches Modell für Lüfter und Gesamtsystem.

Fachliche Ergebnisse

Die in Arbeitsschritt 1.6 des Vorhabens vorgestellten mathematischen Beschreibungen der Schalleistung von Ventilatoren wurden aufgegriffen und weiter detailliert. Für die in der Technik gebräuchlichen Ventilatorbauformen (Axialventilatoren mit und ohne Nachleitrad, Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln, Trommelläufer) wurden Gleichungen für den Oktav-Schalleistungspegel zur Verwendung im Prognosetool (Arbeitsschritt 2.3) bereit gestellt. Als Parameter dienten vor allem die Hauptabmessungen, Betriebsparameter und die Luftleistung. Es wurde ebenfalls auf Einzelheiten wie gestörte Zuströmung, Unterschiede zwischen Ansaug- und Ausblasseite und Einfluss des Zungenabstandes eingegangen.

2.2.3 Modellstufe 1: Gesamtmodell der Kühl- bzw. Lüftungsanlage

Als Softwareplattform für das Tool diente das Programm Microsoft Excel, welches durch eine spezielle Programmierung auf die fachlichen Bedürfnisse (Modellbildung, Programmoberfläche) zugeschnitten wurde. Für jede der oben aufgeführten Komponenten gibt es ein Tabellenblatt, das in die aktuelle Berechnungsmappe kopiert und mit den aktuellen Eingabedaten zur Beschreibung der Komponente ausgefüllt wird. Während des Rechenganges werden die Schalleistungen der Teilschallquellen aller Komponenten überlagert und die Gesamt-Schalleistungen an der Ansaug- und der Ausblasöffnung der Kühlanlage gebildet.

Das Rechentool wurde zur Auslegung der Prototyp-Kühlanlagen benutzt und ständig an die Bedürfnisse angepasst. Anhand der im Projekt durchgeführten Messungen an Komponenten wurden viele der im Tool hinterlegten Formeln validiert. Nach Ansicht der Partner hat es die notwendige Praxisreife, um damit die Schallreduzierung der vielen unterschiedlichen Kühl- und Lüftungsanlagen anzugehen, von denen nur zwei innerhalb des Forschungsvorhabens intensiver behandelt werden konnten.

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Wärmeaustausch: Strömungstechnische, thermische und akustische Aspekte des Wärmetauschers.
DLR Berlin	Ventilator: Akustik- und Strömungsmodell; der Einfluss der Einbaubedingungen (z.B. gestörte Zuströmung) wird - abhängig von der Bauform durch empirische Zuschläge näherungsweise berücksichtigt.
Fraunhofer IBP	Modellbildung für das akustische Kanalnetzwerk einschließlich geeigneter Schalldämpfer und sonstiger Einbauten. Mitgestaltung des Excel-Tools inkl. der Bedienungsanleitung.
Siemens A&D	Aerodynamische und akustische Auslegung der Lüfter.

Siemens VT	Entwicklung von Ansteuerkonzepten von Lüftermotoren im Hinblick auf tatsächlich zu erreichende Kühlerleistungen unter Beachtung örtlicher Wärmebildung im Unterflurbereich.
Siemens Duewag	Strömungstechnische Berechnung der Durchströmung der Anlage bzw. relevanter Baugruppen. Betrachtung der strömungs- und wärmetechnischen Grundfunktion, außerdem: Umsetzung der Berechnungsformeln in einem Berechnungstool (Excel-Tool), Bedienungsanleitung zum Excel-Tool.
Siemens Krauss-Maffei	Verifikation des Excel-Tools.

Fachliche Ergebnisse

Die im Vorfeld zusammengestellten Berechnungsformeln zu den Eigenschaften der einzelnen Komponenten wurden in das Tool integriert. Zur Berechnung der Systemeigenschaften, also die Verknüpfung der einzelnen Komponenten, wurden folgende Lösungsalgorithmen entwickelt und implementiert, z. B. zum Ventilator-Arbeitspunkt, zur Auswahl der optimalen Kombination aus Ventilator Durchmesser und Ventilator Drehzahl unter Berücksichtigung des Massenstroms. Die Theorie der Kulissen- und Rohrschalldämpfer (Ausbreitungsdämpfung, Strömungsrauschen, Druckverluste) wird zusammengestellt, mit Messdaten verglichen und zur Eingabe in das Tool aufbereitet.

2.2.4 Modellstufe 2: Akustische Modellierung des Lüftungsgeräuschs am Beispiel einer E-Lok, Recherche

Ablauf und Tätigkeiten

Deutsche Bahn	Festlegung der anzustrebenden Schallpegel anhand der Messergebnisse und der Modellrechnungen.
Siemens Krauss-Maffei zusammen mit Müller BBM	Recherche, Untersuchung und Bewertung von Rechnertools zur Prognose von Schallwerten. Input für AP 4210.

Fachliche Ergebnisse

Es wurde ein Vielzahl von Programmen zur akustischen Prognose analysiert und evaluiert. Die Recherche hat zum Ergebnis, dass die akustische Modellierung eines Schienenfahrzeugs so komplex ist, dass dafür kein unmittelbar anwendbares, kommerziell verfügbares Rechenprogramm zur Verfügung steht. Die Programme lassen sich, sofern kommerziell verfügbar, zur Lösung von Detailproblemen einsetzen.

Die Berechnung Lüftergeräuschs vom Ventilator bis zum Mikrofonpunkt in der Umgebung des Fahrzeugs sollte, wie auch in diesem Vorhaben geschehen, in zwei Schritten erfolgen. Als erstes wird die Quellenstärke der Lüftergeräusches am Einlass und am Auslass berechnet, dann in einem zweiten Schritt die Schallausbreitung von den Austrittsöffnungen zum Mikrofonpunkt prognostiziert.

Im ersten Teil der Recherche wurden physikalische Grundlagen zur akustischen Berechnung zusammengestellt, der sich dann die Kommentierung der untersuchten Programme anschließt.

2.2.5 Modellstufe 2: Vorbereitung der Modellbildung und Erfassung der akustisch relevanten Daten (E-Lok)

Ablauf und Tätigkeiten

Fraunhofer IBP	Erfassung von akustisch relevanten Komponentendaten (E-Lok) z. B. durch Analogiebetrachtungen und gegebenenfalls messtechnische Charakterisierung, dabei wurden folgende Komponenten im akustischen Windkanal vermessen <ul style="list-style-type: none">• 6 Lüftungsgitter,• ursprünglicher, also unmodifizierter Kühlturm der E-Lok,• daraus der Kühler nochmals einzeln.
Siemens Krauss-Maffei zusammen mit TU Berlin	Vorbereitung der Modellbildung: Erfassung der akustisch relevanten Daten, Einbindung des Modells der Kühl- und Lüftungsanlage in das in AP 4210 zu entwickelnde Modell, außerdem Bereitstellung der Lüftungsgitter für Messungen.

Fachliche Ergebnisse

Die Einbindung der Ergebnisse aus Modellstufe 1 (der Prognose der Quellenstärke von Lüftungssystemen) in die Modellstufe 2 (der Prognose der gesamten Schallemission einer E-Lok) wurde festgelegt. Außerdem wurden Daten von anderen Schallquellen zur Übernahme in die Modellstufe 2 zusammengetragen.

Fehlende Daten zum Strömungsgeräusch (Schalleistung) und zum Druckverlust von Lüftungsgittern wurden im akustischen Windkanal messtechnisch ermittelt. Überdies wurden die Schalleistungen am Einlass und Auslass des unmodifizierten Kühlturms der E-Lok im akustischen Windkanal gemessen.

2.2.6 Vergleich von Messung und Simulation

Ablauf und Tätigkeiten

Deutsche Bahn	Ausführen der akustischen Messungen am Gesamtfahrzeug zur Verifizierung der Simulationen.
Siemens Krauss-Maffei	Vergleich von Messung und Simulation.

Fachliche Ergebnisse

Eine E-Lok der BR 182 (Siemens ES64U2) wurde auf dem Betriebsgelände der DB Systemtechnik in München im Stillstand akustisch vermessen. Die beiden Öl-/Wasser-Kühler (Kühltürme) und die vier Fahrmotorlüfter wurden bei unterschiedlichen Drehzahlen und Kombinationen betrieben. Die Messungen dienen zur Bestimmung des Referenzzustandes, an dem die Zielerreichung des Vorhabens zu messen war sowie zum Abgleich zwischen Rechnung und Prognose in der Modellstufe 2 (AP 4210).

Vergleiche zwischen den in der Modellstufe 2 berechneten und den Messergebnissen zeigen in tiefen Oktavbändern zum Teil deutliche Abweichungen. Das Hauptproblem ist die aus praktischen Gründen gewählte Anwendung der geometrischen Raumakustik, die den Wellencharakter der Schallausbreitung, der gerade bei tiefen Frequenzen wichtig ist, vernach-

lässigt. Die exakte Nachbildung der Wellen würde die Möglichkeiten eines Tools bei weitem übersteigen.

Es gab auch Zweifel an der Exaktheit der Messung, die wegen der geringen Abstände zwischen der Auslassöffnung des Kühlturms unterflur und dem Schotterbett unter nicht adäquaten Mikrofonpositionen zur Erfassung des Schallfeldes litt.

2.3 Untersuchung verschiedener Lösungskonzepte für Triebzug und E-Lok

Das Vorhaben diente auch zum praktischen Nachweis, dass sich die geplante Minderung der A-bewerteten Lüftergeräusche um 8 dB erreichen lässt. Am Beginn stand eine Phase der Ideenfindung, in der die Palette möglicher Maßnahmen aufgezeigt werden sollte und in der konstruktive Lösungen zugelassen waren, welche wegen eines größeren Bauraums oder geringerer Wirtschaftlichkeit sonst keine Chancen auf Realisierung haben. Als konstruktive Basis für eine Triebzugkomponente wurde eine unterflur angeordnete Transformator Kühlanlage und als E-Lok-Anlage der Kühlturm für den Öl- und den Wasserkreislauf ausgewählt. Eigens durchgeführte Messungen haben Informationen über das strömungstechnische und akustische Verhalten einiger Komponenten geliefert. Alle Varianten wurden mit Hilfe des Tools berechnet.

2.3.1 Anwendung des Modells, Parameterstudie

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Anwendung des im Arbeitsschritt 2.1 und 2.3 geschaffenen Modells zur wärmetechnischen Berechnung auf Varianten im Rahmen des Optimierungsprozesses zur leisen Lüftungsanlage.
DLR Berlin	Anwendung Akustikmodell Stufe 1; unter Beachtung der baulichen und betrieblichen Randbedingungen werden - getrennt für die Fälle Triebzug und E-Lok - verschiedene Lösungsvarianten der zu leistenden Kühlaufgabe unter Anwendung der unter m Arbeitsschritt 2 aufgestellten empirischen Geräuschmodelle durchgespielt, um zu einer akustisch und strömungstechnisch optimierten Konfiguration zu kommen.
Fraunhofer IBP	Anwendung Akustikmodell Stufe 1 u. 2 hinsichtlich akustischer Empfehlungen zur Auslegung und konstruktiven Integration des Kanalsystems.
Siemens A&D	Anwendung Akustikmodell Stufe 1 mit Schwerpunkt Lüftung und Strömungstechnik.
Siemens VT	Einbautechnische Studie zur Umsetzung des im Arbeitsschritt 2.3 geschaffenen Modells.
Siemens Duewag zusammen mit Müller BBM	Anwendung des im Arbeitsschritt 2.3 geschaffenen Modells zur strömungs- und wärmetechnischen Berechnung auf Varianten im Rahmen des Optimierungsprozesses zur leisen Lüftungsanlage.
Siemens Krauss-Maffei	Anwendung des Akustikmodells aus AP 4210 auf verschiedene Lösungskonzepte unter Beachtung der Randbedingungen. Zusätzliche Untersuchung zu Absorptionsmaterialien und deren Eignung für eine Anwendung im Lüfterstrang.

Fachliche Ergebnisse

Aus den zuvor durchgeführten Untersuchungen war bekannt, dass Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln bei gleicher spezifischer Strömungsleistung deutlich leiser sind als Axialventilatoren. Die Untersuchungen für beide Funktionsmuster konzentrierten sich auf diesen Ventilator, allerdings in seiner Ausführung als axial durchströmter Radialventilator. Bereits zum Beginn der Arbeiten wurde klar, dass die Kühlanlage möglichst gerade durchströmt werden sollte, um möglichst lange Kanäle zu erreichen, die dann ausreichend Platz zur Positionierung schalldämpfender Komponenten aufweisen.

Für den Kühlturm der E-Lok wurden 16 Varianten, im Falle der Triebzug-Kühlanlage fünf Varianten erarbeitet und mit dem Excel-Tool ihre Schalleistungen am Ein- und Auslass berechnet. Es zeigte sich, dass bei etwas größeren Dimensionen des Kühlturms bzw. der Unterflur-Kühlanlage, allein durch die Auswahl lärmarmen Ventilatoren, ein gutes Potential zur Lärminderung steckt. Unter Beibehaltung der üblichen Abmessungen ist aber der Einsatz von Schalldämpfern bzw. schalldämpfenden Materialien im Lüfterstrang unabdingbar. Besonderes Augenmerk galt der Dimensionierung der Kulissenabsorber, um unter den beschränkten Baulängen und dem gewünschten Frequenzgang des Absorbers das Optimum zu finden.

Die Auswirkungen dieser Varianten auf des gesamte Standgeräusch der E-Lok wurde mit dem in AP 4210 entwickelten Programm analysiert. Wegen der Schallemissionen von gleichzeitig betriebenen Fahrmotorlüftern wirkt sich die lärmarme Ausführung des Kühlturms weniger stark aus.

2.3.2 Entwicklung von Leitlinien

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Erstellung einer Leitlinie mit dem Schwerpunkt Wärmeaustausch.
Deutsche Bahn zusammen mit Müller BBM	Formulierung der funktionalen Anforderungen an Lüfter und eines Katalogs möglicher Schallminderungsmaßnahmen sowie Abgleich beider.
DLR Berlin	Aus den im Arbeitsschritt 3.1 durchgespielten Lösungsvarianten werden allgemeine Leitlinien für die strömungstechnisch und akustisch geeignete Gestaltung von Lüftungsanlagen für Schienenfahrzeuge abgeleitet.
Fraunhofer IBP	Zusammenfassung und Verallgemeinerung der entwickelten Werkzeuge und Regeln zur Integration und Auslegung des Kanalsystems.
Siemens A&D	Erstellung von Auslegungs- und Anwendungsleitlinien für Lüfter.
Siemens VT	Zusammenfassung und Verallgemeinerung mit dem Schwerpunkt Gesamtanordnung der Komponenten.
Siemens Duewag	Zusammenfassung und Verallgemeinerung der erfolgreichen strömungstechnischen Strategien als Leitlinien.

Fachliche Ergebnisse

Es wurde eine gut gegliederte Fülle von Anforderungen und konstruktiven Empfehlungen zusammengetragen, deren frühzeitige Beachtung stark zum Erreichen einer lärmarmen und betriebstauglichen Kühl- und Lüftungsanlage beiträgt.

2.3.3 Auswahl je einer Lösungsvariante für Triebzug und E-Lok

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Mitwirkung und Stellungnahme bei der Bewertung und Entscheidungsfindung der Varianten.
Deutsche Bahn	Stellung nehmende Bewertung und Auswahl der Variante, sowohl hinsichtlich Betriebstauglichkeit als auch schallmindernder Wirkung.
DLR Berlin	Gemeinsam mit den Partnern werden unter Anwendung der in den Arbeitsschritten 3.1 und 3.2 erzielten Ergebnisse die Konzepte für die Funktionsmuster von Triebzug und E-Lok ausgewählt und festgelegt.
Siemens A&D zusammen mit Müller BBM	Bewertung und Auswahl.
Siemens VT	Bewertung und Auswahl einer Vorzugsvariante für Triebzüge.
Siemens Duewag	Einbringen der strömungstechnischen Ergebnisse, Diskussion und Gewichtung der Ergebnisse, Bewertung und Auswahl der besten Lösungsvariante für Triebzüge.
Siemens Krauss-Maffei zusammen mit TU Berlin	Mitwirkung bei der Bewertung der Lösungskonzepte und Entscheidungsfindung zur Konzeptionierung des Funktionsmusters für die E-Lok.

Fachliche Ergebnisse

Nach Aufstellung von Bewertungskriterien für das Triebzug- und für das E-Lok-Funktionsmuster wurden diese angewandt. Es wurden nur Varianten zugelassen, die ungefähr den gleichen Bauraum beanspruchen wie die Ursprungsvariante.

Das E-Lok-Funktionsmuster unterscheidet sich vom Ausgangszustand im Wesentlichen durch die Verwendung eines leiseren axial durchströmten Radialventilators, den Einsatz von Kulissenschalldämpfern im Einlass und Auslass, absorbierende Auskleidung in Teilen des Kanals und eine absorbierende Haube oberhalb des Einlasses auf dem Lokomotivdach.

Beim Triebzugmodell wurde eine gerade Luftführung gewählt, d. h. die Kühlluft wird auf der einen Wagenseite angesaugt und auf der anderen ausgeblasen. Neu sind die zwei axial durchströmten Radialventilatoren, die waagrecht angeordneten Kulissenabsorber auf Einlass- und Auslassseite sowie partielle absorbierende Auskleidungen von Kanalwänden.

Für beide Funktionsmuster war zum Zeitpunkt der Auswahl absehbar, dass sie das Ziel einer Reduzierung der A-bewerteten Schalleistungen um 8 dB erreichen konnten.

2.4 Auslegung und Konstruktion der Funktionsmuster für E-Lok und Triebzug

Die Auslegung der Funktionsmuster ist wegen der vielen technischen und physikalischen Details und der Vernetzung derselben eine anspruchsvollen Aufgabe, die sich in die

- wärmetechnische Auslegung
- regelungstechnische Ansteuerung,
- strömungstechnische Auslegung,
- akustische Auslegung,
- Auslegung der Einbaukonstruktion

gliedern lässt.

Durch eine konsequente Umsetzung der die Komponenten und das Gesamtsystem beschreibenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten in das Auslegungstool (Modellstufe 1) wurde die praktische Durchführung sehr erleichtert. Die weitgehende Nutzung bestehender Anlagenteile hat diesen Effekt noch verstärkt. So entfiel z. B. die Neufassung der regelungstechnischen Auslegung, weil die bestehende übernommen werden konnte. Die Auslegung der Funktionsmuster wurde im Wesentlichen unter Verwendung des Auslegungs- bzw. Rechentools (Modellstufe 1) durchgeführt.

2.4.1 Auslegung der geräuschoptimierten Kühlanlage (je eine für Triebzug und E-Lok)

Ablauf und Tätigkeiten

Siemens Krauss-Maffei zusammen mit Müller-BBM	Wärmetechnische Auslegung der Gesamtanlage.
Deutsche Bahn	Begleitung der Auslegung aus Sicht der Betreibers.
DLR Berlin	Akustik, Strömungstechnik; die im Arbeitsschritt 3.1 definierten Lösungskonzepte werden für zwei konkrete Anwendungsfälle - je ein Triebzug und eine E-Lok - in geräuschoptimierte Kühlanlagen umgesetzt.
Fraunhofer IBP	Konstruktionsbegleitende schalltechnische Auslegung der Kanalsysteme sowie der schalldämpfenden und schalldämmenden Bauteile.
Siemens A&D	Auslegung und Konstruktion der Lüfter unter Berücksichtigung der akustischen und strömungstechnischen Vorgaben.
Siemens VT	Einbautechnische Konstruktionsbegleitung, Umsetzung der Ansteuerungskonzepte für Lüftermotoren für Triebzüge.
Siemens Duewag	Konstruktionsbegleitende strömungstechnische Auslegung der Kühlanlagen. Anwendung des Berechnungsmodells.
Siemens Krauss-Maffei	Mitwirkung bei der Auslegung der Kühlanlage durch Angabe von erforderlichen technischen Daten und Schnittstellen.

2.4.2 Experimentelle schall- und strömungstechnische Untersuchungen an Komponenten und Baugruppen

Ablauf und Tätigkeiten

Deutsche Bahn	Zuarbeiten zum Versuchsaufbau, u. a. falls bahneigene Teile oder Unterlagen gebraucht werden.
Fraunhofer IBP	Durchführung der experimentellen schall- und strömungstechnische Untersuchungen, dabei Messungen im akustischen Windkanal an Komponenten der E-Lok <ul style="list-style-type: none">- Kühlturm (Ausgangszustand und optimierter Zustand),- Wellrippenkühler,- Filter,- Lüftungsgitter,- Dachaufbau für E-Lok.
Siemens A&D	Zuarbeit Versuchsaufbau.
Siemens VT	Einbautechnische Zuarbeit zum Versuchsaufbau des Triebzugmodells.
Siemens Krauss-Maffei	Bewertung der experimentellen Ergebnisse bezüglich eine Umsetzung in einer Lokomotive.

Fachliche Ergebnisse

An einer E-Lok der BR 182 wurden die Schalleistungen auf den Ansaug- und Ausblasöffnungen für den Kühlturm, den Fahrmotorlüfter, den Hilfsbetriebeumrichter und den Luftpresser (nur Auslass) messtechnisch bestimmt. Die Schalleistung am Auslass des Kühlturms war am höchsten, was die Wahl des Kühlturms als zu optimierende Komponente bestätigt.

An dem in den Windkanal eingebauten Kühlturm wurden die Schalleistungen und Volumenströme für den Ausgangszustand und die optimierte Variante gemessen. Dabei wurde auch die Wirkung der verschiedenen Kulissenabsorber ermittelt.

Die Ergebnisse der Messungen am Wellrippenkühler, Filter, Lüftungsgitter und Dachaufbau der E-Lok wurden für zahlreiche Betriebsbedingungen (zumeist Anströmgeschwindigkeiten) ermittelt und dem Auslegungs- und Rechentool (Modellstufe 1) als Eingabedaten zur Verfügung gestellt (siehe Arbeitsschritt 2).

2.4.3 Konstruktion des Funktionsmusters: Kühlanlage Triebzug

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Konstruktion des Funktionsmusters Kühlanlage.
Siemens A&D	Konstruktion Lüfter für Triebzug.
Siemens VT	Einbautechnische Konstruktion des Funktionsmusters dabei Auswahl und Bereitstellung eines gekrümmten Fliehkraft-Sedimentationsabscheiders (FSA).

Fachliche Ergebnisse

Die Konstruktion des Triebzugmodells lehnte sich an die der Transformator-Kühlanlage (Trafokühlanlage) für den ICT2 an. So wurde der Ölkreislauf einschließlich Kühler von der Ausgangsanlage übernommen. Alle anderen lufttechnischen Komponenten (Kulissen, Luftführung, Anordnung der Ventilatoren, Kanäle mit Auskleidungen und gekrümmtes FSA als Ersatz für die Wagenschürze) wurden neu gestaltet. Besonderer Erwähnung bedürfen die beiden parallel angeordneten und neu entwickelten axial durchströmten Radialventilatoren. Die Auslegung wurde unter Anwendung der im Projekt erworbenen Erfahrungen und Kenntnisse mit dem Tool (Modellstufe 1) vorgenommen.

2.4.4 Konstruktion des Funktionsmusters: Kühlanlage E-Lokomotive

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Konstruktion des Funktionsmusters Kühlanlage.
Siemens A&D	Konstruktion Lüfter für E-Lok.
Siemens Krauss-Maffei	Mitwirkung bei der Konstruktion der Lüftungsanlage durch Angabe von erforderlichen technischen Daten und Schnittstellen.

Fachliche Ergebnisse

Das Funktionsmodell für die E-Lok basiert auf dem Kühlturm für die Serienausführung. Durch den Einsatz eines neu entwickelten axial durchströmten Radialventilators und die Anordnung von Absorptionsmaterial in der Luftführung mussten die Konstruktion im Bereich der Ventilatorhalterung und der Ansaugöffnung modifiziert werden. Zur Dämpfung des Ansauggeräusches wurde eine absorbierende Dachhaube oberhalb der Ansaugöffnung angebracht. Die Kanalstrecke zwischen Kühler und Auslass wurde verlängert, um Kulissenschalldämpfer unterbringen zu können.

2.4.5 Schalltechnische Hinweise für die Auslegung von Kühl- bzw. Lüftungsanlagen

Ablauf und Tätigkeiten

Deutsche Bahn zusammen mit Müller-BBM	Zusammenstellung der schalltechnischen Hinweise für die Auslegung von Kühl- bzw. Lüftungsanlagen.
--	---

Fachliche Ergebnisse

Die aus der Auslegungs- und Konstruktionsphase gewonnenen und weitere Erfahrungen werden, gegliedert nach primärem (Lüfterrad, Ventilator typ, Drehzahlregelung) und sekundärem Schallschutz (Anordnung von Kulissen und Wandauskleidungen) im Hauptbericht detailliert dargelegt.

2.5 Bau der Funktionsmuster

2.5.1 Bau des Triebzug-Funktionsmusters

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Fertigung und Montage der Kühlanlage.
Deutsche Bahn	Bereitstellung eines Fahrzeug-Mock-up zwecks Ausführung der Versuche.
Siemens A&D	Fertigung des Funktionsmusters, Prüfung und Bereitstellung zur Montage an der Kühlanlage.

Fachliche Ergebnisse

Die Fertigung des Funktionsmusters für den Triebzug erfolgte bei Behr Industrietechnik. Dort wurden die Komponenten Tragrahmen, Kühler, Luftführungskästen (Ansaug- und Ausblasseite) und Bodenwannen hergestellt und durch die angelieferten Komponenten komplettiert. Die ansaug- und ausblasseitigen Kulissenschalldämpfer wurden von der BBM GERB Akustik GmbH gebaut. Die Lüfter inkl. Luftkasten und Dämmung stammen von Siemens A&D Ventilatoren und das gebogene FSA von der SGW Werder GmbH.

Es war bereits in einem frühen Projektstadium absehbar, dass weder ein Triebzug der BR 411 (ICE-T) noch ein Einzelwagen für den Einbau der Transformatorkühlanlage zur Verfügung stehen würde. Das Funktionsmuster wurde daher für einen Einbau in ein Mock-up vorgesehen. Das aus Holzplatten hergestellte, 4,8 m lange, 2,6 m breite und 2,2 m hohe Mock-up war in seiner Außenkontur dem des ICE-T im Bereich Bodenwanne und Seitenwand angeglichen.

2.5.2 Bau des E-Lokomotiven-Funktionsmusters

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Fertigung und Montage des Kühlturmes.
Deutsche Bahn	Bereitstellung einer E-Lok der ausgewählten BR zwecks Einbau und Messung des Funktionsmusters.
Siemens A&D	Fertigung des Funktionsmusters, Prüfung und Bereitstellung zur Montage an der Kühlanlage.
Siemens Krauss-Maffei	Montage des Funktionsmusters in Erprobungsträger in E-Lok, Rückbau der E-Lok nach Punkt 6.3.

Fachliche Ergebnisse

Das Funktionsmuster für die E-Lok wurde bei Behr Industrietechnik hergestellt. Die Hauptkomponenten Grundrahmen, Kühler, Gehäuse mit Wartungsdeckel, Gehäusedämmung, Zwischenrahmen, Schalldämpferkulissen im Ansaugbereich und Rahmen für die Ausblasseitenschalldämpferkulissen entstammen der Eigenfertigung. Die Kulissenschalldämpfer auf der Ausblasseite und die Dachhaube (Schalldämpfer Dachaufbau) wurden von BBM Gerb gelie-

fert. Der speziell für das Funktionsmuster konzipierte Ventilator wurde von Siemens A&D Ventilatoren geliefert.

Bedingt durch die starke Nutzung der ursprünglich eingeplanten BR 182 durch DB Cargo, wurde eine baugleiche Lok bei Siemens Dispolok für die Versuche angemietet. Ein serienmäßiger Kühlturm wurde ausgebaut und an seiner Stelle das Funktionsmuster eingesetzt. Auf den Anschluss der Kühler an die beiden Kühlmittelkreisläufe wurde verzichtet, um den knappen Versuchszeitplan nicht zu gefährden.

2.5.3 Einarbeitung und Umsetzung von Modifikationen

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik zusammen mit Müller-BBM	Modifikation.
DLR Berlin	Modifikation; basierend auf den in den Arbeitsschritten 5.1 und 5.2 erstellten Funktionsmustern werden strömungstechnisch und akustisch aussichtsreiche Modifikationen der Gesamtkonfigurationen unter Einhaltung der baulichen und betrieblichen Randbedingungen diskutiert und konzipiert.
Fraunhofer IBP	Modifikation schalldämpfender und schalldämmender Bauteile.
Siemens Duewag	Modifikation.

Fachliche Ergebnisse und Kommentar

Der als Bauraum zur Verfügung stehende Platz wurde in beiden Funktionsmustern sehr stark ausgenutzt. Aus diesem Grunde wurden nur kleine Modifikationen vorgenommen, die hauptsächlich in dem Weglassen von schalldämpfenden Komponenten bestanden.

Bei dem Funktionsmuster für den Triebzug wurde ein Schott im Ansaugbereich konzipiert, um ggf. eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Lüfter unterbinden zu können. Nur die zur Strömung weisenden Stirnflächen der Kulissen wurden angeschrägt (Randkulissen) bzw. in Pfeilform (Mittelkulisse) ausgeführt. Eine andere Ausgestaltung der zum Ventilator zeigenden Stirnflächen in Pfeilform bzw. mit halbrunder Kappe (siehe Bild 1) hätte evtl. das Potential gehabt, die Durchströmung der Anlage zu erleichtern und den Volumenstrom zu erhöhen. Diese Untersuchungen wurden mangels Kapazitäten nicht durchgeführt.

Im Falle des E-Lok-Funktionsmusters wären Varianten der Dachhaube in der Größe der Deckfläche und in der Länge des Spalts vorteilhaft gewesen, um den Druckverlust der Anlage herabzusetzen (siehe **Bild 2**).

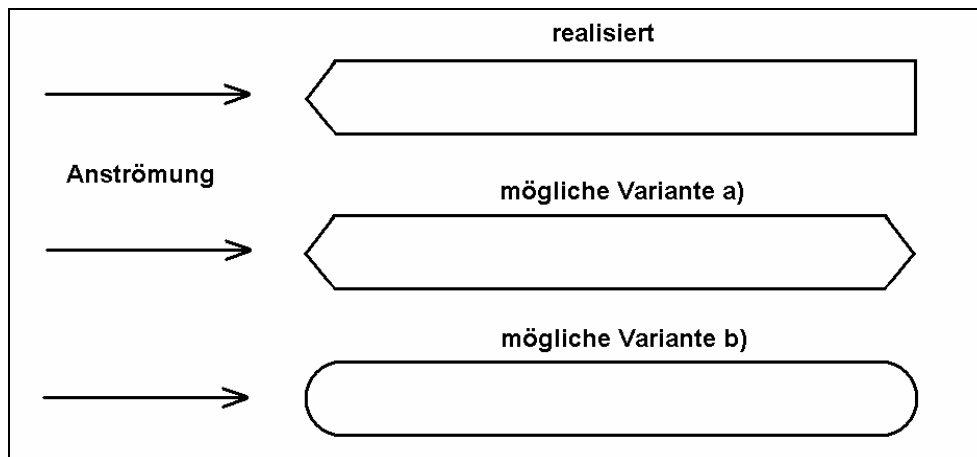


Bild 1: Querschnitte der Kulissenabsorber (hier Mittelkulisse) auf der Einlassseite des Triebzug-Funktionsmodells (Varianten a) und b) wurden nicht untersucht)

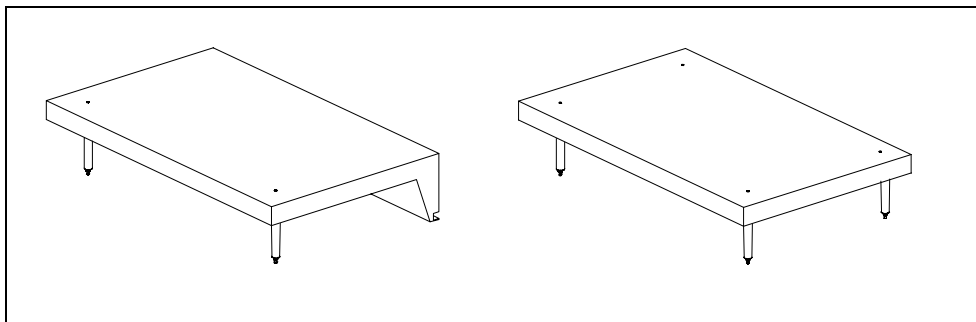


Bild 2: Verbesserung der Einströmsituation im Ansaugbereich des E-Lok-Funktionsmodells, (links Ansaug auf drei Seiten, rechts Ansaug auf vier Seiten)

2.6 Vermessung der Funktionsmuster für Triebzug und E-Lok

Sowohl bei dem Funktionsmodell für den Triebzug wie auch bei demjenigen für die E-Lok wurden die spezifizierten Kühlleistungen um ca. 5 % unterschritten. Nach Ausbau von einigen schalldämpfenden Komponenten konnte der erforderliche Luftvolumenstrom und damit auch die Kühlleistung erreicht werden. In der Versuchsauswertung wird das Erzielen der spezifizierten Kühlleistung als hartes Kriterium angewendet und nur der akustisch deutlich schlechtere Fall mit teilweise abgebauten Schalldämpfern in den Vordergrund gestellt. Danach wäre das Ziel des Vorhabens, die Reduzierung der Lüftungsgeräusche um A-bewertet 8 dB nicht erreicht.

Praktisch ist die 5%ige Unterschreitung der Kühlleistung an den Funktionsmodellen nicht relevant. Durch einige leichte Modifikationen, wie bereits oben angedeutet, lässt sich dieser geringe Mangel leicht beheben. Durch den Termindruck am Ende des Projekts sowie die organisatorischen und budgetseitigen Probleme wären zwei neue Systemtests, eine verlängerte oder auch neue Anmietung der E-Lok sowie neue Messungen zu aufwändig geworden. Es musste auf sie verzichtet werden und damit auf den technisch leicht zu erbringenden Nachweis.

Unter Vernachlässigung der geringfügigen Abweichungen ergeben sich bei dem Triebzug-Funktionsmodell Reduzierungen des A-bewerteten Schalldruckpegels zwischen 9 und 12 dB bei den in der Achse der Kühlanlage liegenden Mikrofonpunkten. In der A-bewerteten Schallleistung wird eine Verringerung um 9 dB zwischen der Referenzanlage und dem optimierten Triebzug-Funktionsmuster ermittelt. Für das E-Lok-Funktionsmuster stellen sich unter den

gleichen Bedingungen A-bewertete Reduzierungen zwischen 11 und 18 dB im Schalldruck ein, die Schalleistung nimmt A-bewertet um 15 dB ab.

2.6.1 Vermessung des Triebzug-Funktionsmusters

Ablauf und Tätigkeiten

Behr Industrietechnik	Typtest der Einzelanlage zum Leistungsnachweis, vereinfachte Schallpegelmessung.
Deutsche Bahn	Messung der Schallpegel nach prEN ISO 3095 einschließlich Terzfrequenzanalysen, bei Bedarf auch Schmalbandanalysen.
Siemens VT	Untersuchungen und Unterlagenerstellung zum Einbau des Funktionsmusters in einen Triebzug.

Fachliche Ergebnisse

Im Typtest hat das vollständige Triebzug-Funktionsmuster 96,2 % der spezifizierten Kühlleistung erreicht, ohne die Mittelkulisse auf der Auslassseite waren es 100 %. Die Ursachen für die Abweichung vom Auslegungszustand liegen sehr wahrscheinlich in der Prognosegenauigkeit bei den Druckverlusten der relativ komplizierten Strömungsbedingungen. Es kann sich nur um kleine Abweichungen handeln, die aber gerade hier über die Zielerfüllung entscheiden. Bei der Auslegung der Anlage stand die Schallreduzierung im Vordergrund, daher wurde auf eine möglichst große Absorberoberfläche geachtet. Eine strömungsgünstigere Ausgestaltung der Kulissen-Stirnflächen hätte die akustisch wirksame Länge der Absorber verkürzt. Mit dem heutigen Wissen, dass die schalldämpfende Wirkung des voll bestückten Triebwagen-Funktionsmusters das Ziel von A-bewertet 8 dB übererfüllt, könnte man die Kulissenabsorber etwas umgestalten, um die Strömungsverluste zu reduzieren und die geforderte Kühlleistung zu erreichen.

Zur Beurteilung der Schallminderung des Triebzug-Funktionsmodells, der Trafokühlanlage, sind die ohne Mittelkulisse auf der Auslassseite erzielten Messergebnisse zu verwenden, weil nur diese Variante die erforderliche Kühlleistung erbringt. Zieht man für einen Vergleich zwischen Ausgangszustand und Funktionsmodell den Schalleistungspegel aus der Rundummessung des Mock-up heran, dann ergibt sich eine A-bewertete Pegelreduzierung von 4,2 dB für die gesamte Anlage. Die Pegeldifferenz des A-bewerteten, energieäquivalenten Mittelwerts des Schalldrucks zwischen der Serienanlage und dem Funktionsmuster ohne Mittelkulissen beträgt auf der Einlassseite 0,4 dB, auf der Auslassseite 13,3 dB.

2.6.2 Vermessung des E-Lok-Funktionsmusters

Behr Industrietechnik	Typtest der Einzelanlage zum Leistungsnachweis, vereinfachte Schallpegelmessung.
Deutsche Bahn	Messung der Schallpegel nach prEN ISO 3095 einschließlich Terzfrequenzanalysen, bei Bedarf auch Schmalbandanalysen.
Siemens Krauss-Maffei	Vergleich der Werte aus Simulation und Messung. Analyse der Ursache bei eventuellen Abweichungen.

Fachliche Ergebnisse

Beim Typtest zeigte sich, dass der Stromrichter-Kühler seine Soll-Kühlleistung in voller Höhe erreicht. Der im Luftstrom dahinter liegenden Trafokühler kann jedoch nur 95 % der erforder-

lichen Kühlleistung aufbringen. Die Erklärung setzt bei der Prognosegenauigkeit des Tools (Modellstufe 1) an, welche die besonderen, eher unkonventionellen Formgebungen der Kulissenabsorber auf der Einlassseite nur näherungsweise berechnen kann. Die Abweichung äußert sich in einem etwas geringeren Prognosewert für die Druckverluste dieser Kulissenabsorber, die dann in der Prognose einen etwas über den realen Verhältnissen liegenden Volumenstrom ausweisen. Die Probleme zum Erbringen der erforderlichen Kühlleistung am realen Kühlturm ließen sich auf diese Weise im Vorfeld nicht erkennen.

Zur Beurteilung der Schallminderung sind nur die ohne Dachhaube erzielten Messergebnisse zu verwenden, weil nur diese Variante alle erforderlichen Kühlleistungen erbringt. Zieht man für einen Vergleich zwischen Ausgangszustand und Funktionsmodell den energieäquivalenten Mittelwert des Schalldrucks aus der Rundum-Messung an der Lok heran, dann ergibt sich eine A-bewertete Pegelreduzierung von 5,2 dB für die Einlassseite und von 18,0 dB für die Auslassseite.

Eine Variation der Dachhaube, z. B. durch eine kleinere Deckfläche und/oder die Ansaugung auf vier anstatt nur auf drei Seiten (siehe **Bild 2**) könnte die gewünschte Steigerung des Volumenstroms und somit der Kühlleistung bewirken. Die Schalldämpfung würde vermutlich zwischen den beiden Zuständen „mit Dachhaube“ und „ohne Dachhaube“ liegen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Bereits bei der Konzeption des vorliegenden Forschungsvorhabens AP 4220 wurde viel Arbeit investiert, das technisch und auch organisatorisch komplexe Thema der Minderung der Lüftungsgeräusche erfolgreich anzugehen. Die Zusammenarbeit der zahlreichen Fachleute aus unterschiedlichen Fachdisziplinen und Organisationen war nötig, weil hier ein technisches System zu optimieren war, dessen Bearbeitung in Form eines Forschungsvorhabens noch am besten zu bewältigen ist. Das Ziel des Vorhabens war die Reduzierung der Lüftungsgeräusche um A-bewertet 8 dB.

Nach Sammlung des aktuellen Standes der Technik, Aufarbeitung der theoretischen Grundlagen, Messung fehlender Kenngrößen wurde ein Rechentool zur Prognose der Schallemission von Kühl- und Lüftungsanlagen entwickelt. In ihm lassen sich die Komponenten einer Anlage vom Lüfter, Kühler, Kanal, Schalldämpfer bis zu den Gittern und Filter zu einem System verknüpfen, welches dann unter gleichzeitigen Beachtung von strömungstechnischen und akustischen Gesetzmäßigkeiten berechnet werden kann. Mit der Nachbildung des Systems in einem Rechentool wurde ein Werkzeug geschaffen, welches auch nach Ende der Projektlaufzeit zur Verfügung stehen wird, um die zahlreichen Kühl- und Lüftungsanlage von angetriebenen Schienenfahrzeugen lärmarm auszulegen.

Der praktische Teil des Vorhabens, der die Machbarkeit der Geräuschreduzierung an zwei zu bauenden Anlagen aufzeigen sollte, startete auch erst einmal mit theoretischen Überlegungen. In einer Phase der Ideenfindung wurden technische Lösungskonzepte erdacht, mit Hilfe des Tools berechnet und anschließend bewertet. Es fanden sich Lösungen, die bei etwas vergrößertem Bauraum und Einsatz lärmarmen Komponenten die gewünschte Reduzierung technisch erreichten. Da dieses Mehr an Bauraum nur in Ausnahmefällen zur Verfügung steht, konnte bei der Auslegung der beiden Anlagen, einer Transformator-Kühlanlage für die BR 411 (ICE-T bzw. ICT2) und dem Öl-/Wasser-Kühlturm der BR 182, auf den Einsatz von Schalldämpfern nicht verzichtet werden. In dieser Projektphase wurden außerdem zahlreiche Messungen zur Bestimmung technischer Eigenschaften von Komponenten durchgeführt und ihre Ergebnisse in das Rechentool übertragen.

Es gab eine Zusammenarbeit mit dem AP 4210 „Akustisches Qualitätsmanagement“, in dessen Verlauf nahezu zeitgleich ein Prognoseprogramm für die gesamte Schallemission einer Lokomotive entstand.

Bei der Auslegung der Funktionsmuster musste versucht werden, die Kühl- und Lüftungsanlagen so lang wie möglich auszuführen, um Platz für die Integration schalldämpfender Auskleidungen und Kulissenabsorbieren zu schaffen. Bei der Unterfluranlage wurden deshalb Ein- und Auslass auf unterschiedliche Wagenseiten gelegt. Durch einen Dachaufsatz und Nutzung kleiner Freiräume an der Ausblasöffnung unterflur konnte auch die nutzbare Länge im bzw. am Kühlturm gesteigert werden. Der Einsatz leiser Ventilatoren birgt erhebliches Lärmreduzierungspotential und ist wichtig, gerade wegen des begrenzten Bauraums zur Anbringung zur Anbringung absorbierender Komponenten.

Die Funktionsmuster wurden konstruiert, gefertigt und dann einem Systemtest unterzogen. Es zeigte sich bei beiden Funktionsmodellen, dass die spezifizierte Kühlleistung im Mittel um 5 % unterschritten wurde. Die Unterflurkühlanlage wurde in ein Mock-up, welches den Unterflurbereich des Triebzugs ein Stück weit nachbildete, eingebaut, elektrisch über einen Umrichter gespeist und im Freien akustisch vermessen. Eine Lok der BR 182 wurde angemietet und der optimierte Kühlturm mit seinen Komponenten eingesetzt, elektrisch angeschlossen und dann akustisch untersucht.

Unter Vernachlässigung der fehlenden Kühlleistung von 5 %, sie ist praktisch ohne Bedeutung, sind beide Funktionsmodelle sehr erfolgreich. Die optimierte Unterflur-Kühlanlage hat eine A-bewertete, im Vergleich zum Vorgängermodell um 9 dB reduzierte Schalleistung. Beim E-Lok-Funktionsmodell beträgt die Reduktion sogar 15 dB.

Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens werden dringend zur Entwicklung leiser Kühl- und Lüftungsanlagen angetriebener Schienenfahrzeuge benötigt, um in Zukunft die niedrigen Schallemissionsgrenzwerte aus Lastenheften und europäischer Gesetzgebung einhalten zu können.

4 Literatur

- [1] Kurze, U.J.; Diehl, R.; Weißenberger, W.: Sound emission limits for rail vehicles, *Journal of Sound and Vibration* 231, 497 – 504 (2000)
- [2] Hecht, M.; Zogg, H.: Lärmdesign moderner Triebfahrzeuge am Beispiel der Lok 2000-Familie, *ZEV+DET Glasers Annalen*, 119 (1995), H. 9/10
- [3] Wettschurek, R.; Hauk, G.: Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr, Taschenbuch der technischen Akustik, Hrsg. M. Heckl, H.A. Müller, 2. Auflage, 1994
- [4] Goldstein, M.: Unified approach to aerodynamic sound generation in the presence of solid boundaries, *J. Acoust. Soc. America*, 56 (174), 497-509
- [5] Neise, W.: Review of fan noise generation mechanisms and control methods, *Proc. International Fan Noise Conference*, Senlis, Frankreich, Sep. 1992, 45-56
- [6] Fukano, T.; Takamatsu, Y.; Kodama, Y.: The effects of tip clearance on the noise of low pressure axial and mixed flow fans, *J. Sound Vibration*, 105 (1986), 291-308
- [7] Kameier, F.; Nawrot, T.; Neise, W.: Experimental investigation of tip clearance noise in axial flow machines, *Proc. DGLR/AIAA 14th Aeroacoustics Conference*, Aachen, Mai 1992, 250-259
- [8] Kameier, F.: Experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Minderung des Blattspitzen-Wirbellärms axialer Strömungsmaschinen. Dissertation TU-Berlin, 1993, VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 7, Nr. 243, VDI-Verlag, 1994
- [9] Chou, S.R.: A Study of rotor broad band noise mechanisms and helicopter tail rotor noise. NASA-CR 177565, 1990 National Aeronautics and Space Administration, USA
- [10] Bridelance, J.P.: Aeroacoustic study of axial fans with small diameter. Analysis and suppression of instability noise, *Proc. INTER-NOISE'86 Cambridge*, USA, July 1986, 141-146
- [11] Kameier, F., Neise, W.: Verfahren zur Reduzierung der Schallemission sowie zur Verbesserung der Luftleistung und des Wirkungsgrads bei einer axialen Strömungsmaschine, Deutsches Patent P 43 10 104.6 Anmeldung 27.3.1993
- [12] Stütz, W.: Variation der Laufradgeometrie als Mittel zur Beeinflussung des Geräuschverhaltens von Axialventilatoren, *VDI-Bericht 872* (1991), 383-396
- [13] Bommers, L.: Lärminderung bei einem Radialventilator kleiner Schnellläufigkeit unter Berücksichtigung von Zungenform, Zungenabstand und Schaufelzahl, *Heizung, Lüftung, Haustechnik* 31 (1980), 173-179 und 210-218
- [14] Schmidt, L.: Der Einfluss eines 90°-Rohrkrümmers auf die Schallemission eines Axialventilators. *Luft- und Kältetechnik* (1976), 287-290
- [15] Neise, W.; Hoppe, G.: Effect of inflow conditions on centrifugal fan noise, 1st European Symposium on Air Conditioning and Refrigeration, Brüssel, Belgien, 5+6 Nov.1986, 165-172

- [16] Brandstätt, P.; Frommhold, W.: Program for the computation of absorptive silencers in straight ducts. *Applied Acoustics* 43 (1995), H. 1, 19-38
- [17] Mechel, F.-P.: *Schallabsorber*, Bd. I - III. Stuttgart: Hirzel Verlag, 1998
- [18] Cummings, A.; Sormaz, N.: Acoustic attenuation in dissipative splitter silencers containing mean fluid flow. *Journal of Sound and Vibration* 168 (1993), H. 2, 209-227
- [19] Cummings, A.; Astley, R.J.: The effects of flanking transmission on sound attenuation in lined ducts. *Journal of Sound and Vibration* 179 (1995), H. 4, 617-646
- [20] Frommhold, W.: Berechnung von Schalldämpfern mit periodisch angeordneten $\lambda/4$ -Resonatoren. *Acustica* 72 (1990), H. 3, 180-188
- [21] Fryer, J. C.: Stack silencers for the eraring power station. *Noise control engineering Journal* 32 (1989), H. 3, S. 89-92
- [22] Fuchs, H. V.; Ackermann, U.; Frommhold, W.: Entwicklung von nicht-porösen Absorbieren für den technischen Schallschutz. *Bauphysik* 11 (1989), 28-36
- [23] Mechel, F. P.: Helmholtz resonators with added porous absorbers. *Acustica* 80 (1994), 268-279
- [24] Nelson, P. A.; Elliott, S.J.: *Active Control of Sound*. Academic Press Limited London, 1992
- [25] Laugesen, S.: Active control of tonal noise in a large chimney stack. *Proceedings NOISE-93*, St. Petersburg, Russia, 179-184
- [26] Steinegger, G.: Aktive Lärmbekämpfung. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 45 (1998), H. 4, 160-161
- [27] Neise, W.: Grundlagen der Schallentstehung und Lärminderungsmaßnahmen bei Ventilatoren. *Handbuch Ventilatoren*, Vulkan-Verlag Essen 1994, 406-427.
- [28] Krüger, J., Leistner, P.: An active silencer for harsh environmental conditions. *FORUM ACUSTICUM 99*. The Joint DEGA/ASA/EAA Meeting - Berlin 1999.
- [29] IFV Bahntechnik: Projektbeschreibungen Leise Züge und Trassen, Projekt Netzwerk Leiser Verkehr, Berlin, 3.11.1999
- [30] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 414. Verordnung: Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung (SchLV), Wien, Verlagspostamt 1030 Wien, 25. Juni 1993.
- [31] UIC 651: Gestaltung der Führerräume von Lokomotiven, Triebwagen und Steuerwagen. UIC-Kodex, Internationaler Eisenbahnverband, 2. Ausgabe, 1. Januar 1994.
- [32] DIN ISO IEC 14163 Akustik-Leitlinien für den Schallschutz durch Schalldämpfer, Mai 1999
- [33] Kurze, U.J.: Schalldämpfer-Anwendungen. *UTEC* 93, Wien, 70 – 72 (1993)
- [34] Reiss, G.: AP 4220: Minderung der Lüftungsgeräusche angetriebener Schienenfahrzeuge. Vortrag gehalten auf Statusseminar Leiser Verkehr, Bonn, 17./18. Juni 2003

- [35] Hemsworth, B.: Strategic results of STAIRRS. Workshop „Railway Noise Abatement in Europe“, Brüssel, Belgien, 29. Oktober 2003,
<http://europa.eu.int/comm/transport/rail/environment/doc/noise-2.pdf>

- [36] Bay, K., Brandstät, P., Rambašek, N.: Mitigation of the ventilation noises at the electric locomotive BR-182. Vortrag gehalten auf Gemeinschaftstagung CFA/DAGA '04, Straßburg, Frankreich, 22.-25.03.2004